

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 公表特許公報 (A)

(11) 特許出願公表番号

特表2006-527386

(P2006-527386A)

(43) 公表日 平成18年11月30日 (2006.11.30)

(51) Int. Cl.

G02F 1/035 (2006.01)

F I

G02F 1/035

テーマコード (参考)

2H079

審査請求 有 予備審査請求 未請求 (全 22 頁)

(21) 出願番号 特願2005-503849 (P2005-503849)
 (86) (22) 出願日 平成15年7月10日 (2003.7.10)
 (85) 翻訳文提出日 平成17年11月22日 (2005.11.22)
 (86) 国際出願番号 PCT/JP2003/008767
 (87) 国際公開番号 WO2005/006603
 (87) 国際公開日 平成17年1月20日 (2005.1.20)
 (81) 指定国 EP (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IT, LU, MC, NL, PT, RO, SE, SI, SK, TR), CN, JP, US

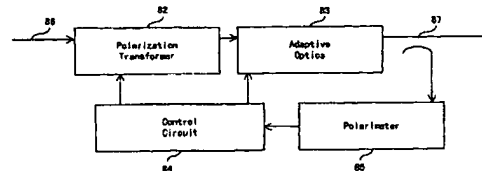
(71) 出願人 000005223
 富士通株式会社
 神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番1号
 (74) 代理人 100074099
 弁理士 大倉 義之
 (74) 代理人 100067987
 弁理士 久木元 彰
 (72) 発明者 ラスムッセン, イエンス シー
 神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番1号 富士通株式会社内
 (72) 発明者 磯村 章彦
 神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番1号 富士通株式会社内

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 巻き戻し動作が不要な、リセットフリーかつエンドレス偏波制御のための偏波モード分散補償器およびその方法

(57) 【要約】

補償光学系の出力光信号の偏波状態および歪みを表すフィードバック信号を用いて、偏波モード分散補償器内の偏波変換器の、環境変化および時間とともに変化するデバイス特性に合わせて、偏波変換器を調整する。



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

入力光信号の偏波を変換する偏波変換器と、
前記入力光信号の偏波モード分散を補償して、出力光信号を出力する補償光学部と、
前記出力光信号の偏波状態および偏光度を計測し、計測された偏波状態および偏光度を表すフィードバック信号を生成する偏光計と、
前記フィードバック信号に基づいて、前記偏光度が計測される複数の目標偏波状態が後続動作における出力光信号内で実現されるように前記偏波変換器を調整する、制御信号を生成する制御回路と
を備えることを特徴とする偏波モード分散補償器。

10

【請求項 2】

前記偏波変換器のデバイス動作がエンドレスに回転可能な波長板に相当するように制御電圧が印加される、 LiNbO_3 基材上の多段の 3 電極構造により、該偏波変換器が実現されることを特徴とする請求項 1 記載の偏波モード分散補償器。

【請求項 3】

偏波保持ファイバおよび複屈折結晶のうちの一方によって一定量の群遅延時間差が生じるように、前記補償光学部が実現されることを特徴とする請求項 1 記載の偏波モード分散補償器。

【請求項 4】

前記補償光学部は、2つの隣接する群遅延時間差生成素子の各々の固有軸に対して 45 度の角度の傾きの固有軸を持つ、少なくとも 1 つの独立に制御可能な可変遅延器により分離された、複数区間の群遅延時間差生成素子を備えることを特徴とする請求項 1 記載の偏波モード分散補償器。

20

【請求項 5】

前記制御回路は、偏波空間における実際の状態の周辺で最大偏光度の状態を探索することで前記複数の目標偏波状態の中から最適状態が見つけれられるように前記偏波変換器を調整する、前記制御信号を生成することを特徴とする請求項 1 記載の偏波モード分散補償器。

【請求項 6】

前記制御回路は、前記計測された偏波状態および偏光度を記録し、偏波の変化から、前記偏波空間において前記複数の目標偏波状態が互いに均等に分離し、かつ、前記実際の状態から均等に離れるように前記偏波変換器を調整する、制御信号を計算することを特徴とする請求項 5 記載の偏波モード分散補償器。

30

【請求項 7】

前記複数の目標偏波状態はあらかじめ設定され、前記偏波空間において前記実際の状態の周囲の円上に所定の距離を置いて配置されることを特徴とする請求項 6 記載の偏波モード分散補償器。

【請求項 8】

前記制御回路は、前記計測された偏波状態および偏光度を記録し、偏波の変化から、前記偏波空間において前記複数の目標偏波状態が互いに不均等に分離し、かつ、前記実際の状態から不均等に離れるように前記偏波変換器を調整する、制御信号を計算し、該偏波空間における各目標偏波状態と該実際の状態の間の距離を用いて該複数の目標偏波状態における計測された偏光度を重み付けすることを特徴とする請求項 5 記載の偏波モード分散補償器。

40

【請求項 9】

前記制御回路は、前記複数の目標偏波状態の一部が実現されない場合に前記偏波変換器の変化するデバイス特性を認識し、該偏波変換器の該デバイス特性を記述する電圧を再計算して計算された電圧を該偏波変換器に印加する制御信号を生成することで、該偏波変換器をエンドレスに回転可能な波長板のように動作させる、という対策をとることを特徴とする請求項 1 記載の偏波モード分散補償器。

50

【請求項 10】

入力光信号の偏波を変換する偏波変換器と、
前記入力光信号の偏波モード分散を補償して、出力光信号を出力する補償光学部と、
前記出力光信号の偏波状態および歪みを計測し、計測された偏波状態および歪みを表すフィードバック信号を生成する歪みアナライザと、
前記フィードバック信号に基づいて、前記歪みが計測される複数の目標偏波状態が後続動作における出力光信号内で実現されるように前記偏波変換器を調整する、制御信号を生成する制御回路と
を備えることを特徴とする偏波モード分散補償器。

【請求項 11】

偏波変換器により、入力光信号の偏波を変換し、
補償光学部により、前記入力光信号の偏波モード分散を補償して、出力光信号を生成し、
前記出力光信号の偏波状態および歪みを計測して、計測された偏波状態および歪みを表すフィードバック信号を生成し、
前記歪みが計測される複数の目標偏波状態が後続動作における出力光信号内で実現されるように、前記フィードバック信号に従って前記偏波変換器を調整することを特徴とする偏波モード分散補償方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、光の偏波状態を制御する方法に関する。本発明は、特に、任意の変化する偏波から静的偏波へのエンドレス変換、またはその逆のエンドレス変換を提供する制御方法、任意の変化する偏波から任意の変化する偏波への一般変換のための制御方法、およびこれらの制御方法を実装する偏波モード分散補償器に関する。

【背景技術】

【0002】

光伝送システムのビットレートが高ければ高いほど、光ファイバの一定量の偏波モード分散が伝送される信号をより大きく歪ませる。

偏波モード分散により、いわゆるシングルモードファイバ内の2つのモードは異なる速度で伝搬する。初期パルスはそのエネルギーを2つのモードに分配する。それらの2つのモードには伝搬中に群遅延時間差が生じる。これは、ファイバの終端におけるパルスの拡がりをもたらす。2つのモード間の群遅延時間差がビット持続時間のオーダーになればなるほど、隣接するパルスはより大きく重複することになり、少なくともビット誤り率の増加をもたらす。あるいはパルスの識別を不可能にすることさえある。偏波モード分散は、内部複屈折（例えば、ファイバコア構造の不規則性）または外的要因により誘発された複屈折（例えば、曲げ、絞り等）によるものである。大規模なシングルモードファイバでは、ランダムに変化する場所において、例えば、温度のような環境変化によりランダムに変動する強度で偏波モード結合が発生するため、偏波モード分散そのものが時間とともに変化する。主偏波状態間の瞬時の群遅延時間差がマクスウェルの確率分布関数に従うことは周知である。マクスウェル分布する瞬時の群遅延時間差の平均値は、ファイバの平均群遅延時間差または偏波モード分散値（PMD）として知られている。強い偏波モード結合を持つ大規模なシングルモードファイバの偏波モード分散値は、ファイバ長の平方根に比例する。

【0003】

偏波モード分散による信号の歪みを緩和するために、ファイバに近い量の逆符号の群遅延時間差をもたらす光学素子をファイバの終端に設置してもよい。大規模な光ファイバにおける瞬時の群遅延時間差および主偏波状態のランダムな性質のため、偏波モード分散を補償するために用いられる光学素子を、一時的なファイバ状態に対して適応的に調整しなければならない。したがって、閉ループ設計の偏波モード分散補償器は、図1に示すよう

に、

1. 偏波変換器
2. PMD補償光学素子（適応光学系）
3. 歪みアナライザ
4. 制御ロジック

からなる。

【0004】

図1において、歪みアナライザ14は、光ファイバの一時的な偏波モード分散状態に最も良く一致するように偏波変換器11および適応光学系12を適応的に調整するために、制御ロジック13に対して信号歪みの指標を提供する。

10

【0005】

例えば、スペクトルホールバーニング（SHB）、直接アイオープニング解析等のような方法に加えて、偏光度（DOP）を偏波モード分散による信号歪みの解析に用いることができる。当業者にとって、スペクトル幅に反比例するコヒーレンス長が群遅延時間差のオーダーであれば、光ビームが劣化することは周知である。群遅延時間差がコヒーレンス長に比べて大きくなればなるほど、ビームはより大きく劣化し、その偏光度はより大きく減少する。このような周知の物理的効果はそのまま、偏波モード分散補償器の光学素子を適応的に制御するフィードバック信号として用いることができる。ファイバの異方性による光信号の偏波解消を信号スペクトル（帯域幅、形状）、群遅延時間差、および入力偏波状態の関数として導出する方法は、非特許文献1に示されている。

20

【0006】

スペクトルホールバーニング、アイオープニングの直接計測、あるいはビット誤り率検出に比べて、偏光度を適応偏波モード分散補償のフィードバック信号として用いる方法の利点は、次の通りである。

1. ビットレートに無関係
2. 任意の変調方式に対して変更することなく適用可能
3. 偏光度は偏波モード分散のみによる信号歪みの良好な指標を提供するという具合に、波長分散の影響を受けない

図2は、非ゼロ復帰（NRZ）方式にて48 Gbit/sのビットレートで変調された伝送信号の偏光度およびQペナルティを、瞬時の群遅延時間差の関数として示している。

30

ここで、Qペナルティは次のように定義される。

【0007】

【数1】

$$Q \text{ ペナルティ} = 20 \cdot \log \frac{\text{Eye - opening of received signal}}{\text{Back - to - back eye - opening}} \quad (1)$$

【0008】

図2では、参考のため、24 GHz（ビットレートの半分）のスペクトル成分のパワーも瞬時の群遅延時間差の関数として示されている。ビットレートの半分のスペクトル成分は、瞬時の群遅延時間差に対して最も強い依存性を示すことが判明している。

40

【0009】

瞬時の群遅延時間差がなくなったときに唯一の極大値を取る偏光度とは反対に、24 GHzのスペクトル成分は周期的な振る舞いを示している。したがって、瞬時の群遅延時間差がビット持続時間を超えると予想される場合には、曖昧さを避けるために、少なくとももう1つのスペクトル成分、すなわち12 GHz（ビットレートの4分の1）を付加的にテストしなければならない。

【0010】

小さな群遅延時間差の値に対する偏光度と、24 GHz（ビットレートの半分）、12 GHz（ビットレートの4分の1）、および6 GHz（ビットレートの8分の1）のスペクトル成分のパワーの詳細を図3に示す。

50

【0011】

図4は、任意の変化する入力偏波から任意の変化する出力偏波への一般偏波変換を実現する偏波変換器の一構成を示している。この構成は、 0° 、 45° 、 0° 、および 45° の傾きの固定された固有軸をそれぞれ有する4つの可変遅延器41、42、43、および44からなる。入力光45は、これらの遅延器を通過し、出力光46として出力される。

【0012】

これらの遅延器の各々が 4π の調整レンジを持つものとする、任意の変化する入力偏波から任意の変化する出力偏波への偏波変換が可能になる。しかし、これらの遅延器の1つが調整限界に達する、すなわち、所望の変換のために、与えられたレンジを超える調整を行わなければならないと、巻き戻し動作が必要になる。巻き戻し動作中には、残りの3つの遅延器に偏波制御を引き継がせながら、限界に達した遅延器を調整限界から遠い状態に連続的に戻す必要がある。この種の動作には処理時間がかかり、偏波変動に対する応答速度を低下させる。もし、高速変動が起こると思われる状況で巻き戻し動作が必要になると、処理速度の制限のために偏波制御は不可能になるかも知れない。このため、原理的に巻き戻し動作が不要な偏波変換装置を実現することが望ましい。

【0013】

巻き戻し動作が不要な、任意の変化する入力偏波から任意の変化する出力偏波への一般偏波変換を実現するために、幾つかの構成が挙げられる（例えば、非特許文献2を参照）。

【0014】

図5は、このような一般偏波変換を実現する一構成を示している。この構成は、自由に回転可能な $\lambda/4$ 、 $\lambda/2$ 、および $\lambda/4$ 波長板51、52、および53からなり、これらの波長板が $\pi/2$ 、 π 、および $\pi/2$ の位相シフトを生じさせる1つの、そしてただ1つの特定波長に対して、エンドレス偏波変換を提供することが知られている。入力光54は、これらの波長板を通過し、出力光55として出力される。

【0015】

正確な位相シフトの厳しい要請から、この構成の使用可能性は微小な波長レンジのみに限定される。要求される構造からはさらなる制限が生じ、この構成を非常に低速なものにする。

【0016】

ニオブ酸リチウム（ LiNbO_3 ）基材上の偏波変換デバイスを実現する基本構造は、図6に示すようなものである。これは、 LiNbO_3 基材65、導波路64、パッド層66、および3つの電極61、62、63からなる。光信号は、導波路を通過する。

【0017】

中央の電極62を接地し、正または負の電圧を外側の電極61および63に印加することにより、導波路内に水平方向の電界が発生する（x方向）。逆符号の電圧を外側の電極61および63に印加することにより、導波路内に垂直方向の電界が発生する（y方向）。xカット、z伝搬の LiNbO_3 基材では、これらの電界が電気光学係数 r_{12} 上の屈折率を変化させる。

【0018】

デバイス特性を記述する3つの電圧を以下のように定義する。

- V_{bias} は、内部複屈折がキャンセルされる電圧である。
- V_0 は、全横電気-横磁気（TE-TM）モード変換が起こる電圧である。

$$V_n$$

は、TEモードとTMモードの間で 180° の位相シフトが生じる電圧である。

このとき、回転角 $\theta/2$ のエンドレスに回転可能な $1/n$ 波長板として振る舞うように、デバイスを制御することができる。これを達成するため、電極61に印加される電圧 V

、および電極 6 3 に印加される電圧 V_3 を、次のように計算する。

【0019】

【数2】

$$V_1 = \frac{V_0}{n/2} \sin(\theta) - \frac{V_\pi}{n} \cos(\theta) - \frac{V_{bias}}{2} \quad (2)$$

$$V_3 = \frac{V_0}{n/2} \sin(\theta) + \frac{V_\pi}{n} \cos(\theta) + \frac{V_{bias}}{2} \quad (3)$$

10

【0020】

この計算により、理論的には、エンドレスに回転可能な波長板のような動作が保証される。周期的な形式で電圧を印加するため、制御限界に達することはない。したがって、巻き戻し動作は不要である。エンドレスに回転可能な波長板としての動作を保証するために必要となるのは、 V_{bias} 、 V_0 、および

V_π

によるデバイス特性の知識である。

20

これらの電圧は計測により取得可能であるが、変化を受けやすい。実際のところ、これらの電圧は温度および波長に依存するだけではない。このようなデバイスへの直流(DC)電圧の印加により起こるドリフトのために、デバイス特性は変化する。特に、電圧 V_{bias} は、DCドリフトによる変化を受けやすい。時間とともに、 V_{bias} 、 V_0 、および

V_π

により記述されるデバイス特性は変化する。このため、計測から導出された初期電圧の集合は無効となり、エンドレスに回転可能な波長板のようなデバイスの動作は、もはや不可能である。

30

【0021】

通常動作中のデバイスの特性を導出可能な方法が見つかれば、図6に示した基本構造を用いて、任意の変化する入力偏波を任意の変化する出力偏波へ変換する主要機能を持った偏波変換器を実現することができる。このようなデバイスを図7に示す。このデバイスは、LiNbO₃ 基材81、導波路80、および3つの電極区間からなる。第1、第2、および第3の区間は、電極71乃至73、74乃至76、および77乃至79をそれぞれ含む。すべての中央電極72、75、および78を接地し、電圧 V_1 、 V_2 、 V_3 、 V_4 、 V_5 、および V_6 を、

【0022】

【数 3】

$$V_1 = \frac{V_0}{2} \sin(\alpha) - \frac{V_\pi}{4} \cos(\alpha) - \frac{V_{bias}}{2} \quad (4)$$

$$V_2 = \frac{V_0}{2} \sin(\alpha) + \frac{V_\pi}{4} \cos(\alpha) + \frac{V_{bias}}{2} \quad (5)$$

$$V_3 = V_0 \sin(\beta) - \frac{V_\pi}{2} \cos(\beta) - \frac{V_{bias}}{2} \quad (6)$$

$$V_4 = V_0 \sin(\beta) + \frac{V_\pi}{2} \cos(\beta) + \frac{V_{bias}}{2} \quad (7)$$

$$V_5 = \frac{V_0}{2} \sin(\gamma) - \frac{V_\pi}{4} \cos(\gamma) - \frac{V_{bias}}{2} \quad (8)$$

$$V_6 = \frac{V_0}{2} \sin(\gamma) + \frac{V_\pi}{4} \cos(\gamma) + \frac{V_{bias}}{2} \quad (9)$$

【0023】

の形で外側の電極 71、73、74、76、77、および 79 にそれぞれ印加することにより、それぞれ角度 α 、 β 、および γ の傾きの、自由に回転可能な $\lambda/4$ 、 $\lambda/2$ 、および $\lambda/4$ 波長板のように、全構造が動作する。特性電圧 V_{bias} 、 V_0 、および

V_π

は、3つの区間の各々に対して異なってもよい。

以下に、従来の偏波制御の問題点をまとめることにする。

重要なのは、高速な光遠隔通信システムにおける偏波モード分散 (PMD) の適応補償に対して偏波制御を適用することである。PMD が伝送中に光パルスの拡がりを引き起こすことは周知である。光ファイバ内の 2 つの偏波モードには、パルスの拡がりとして顕在化する群遅延時間差が生じる。PMD を補償するためには、群遅延時間差 (DGD) 素子を後段に持つ偏波コントローラ (偏波変換器) を用いることができる。この場合、オルトバナジウム酸イットリウム (YVO_4)、二酸化チタン (TiO_2)、炭酸カルシウム ($CaCO_3$) 等のような複屈折結晶や、偏波保持ファイバ (PMF) が、DGD 素子として用いられる。PMD を補償するには、DGD 素子の高速固有軸を変換して伝送システムの低速出力主偏波状態 (PSP) に一致させるように、偏波コントローラを調整しなければならない。この場合、伝送ファイバの DGD は、偏波コントローラに続く DGD 素子により生成される DGD の量だけ減少する。また、2 番目の方法では、DGD 素子の固有軸を適切に変換することで伝送ファイバの入力 PSP を送信光信号の偏波状態に一致させるように、偏波コントローラを調整しなければならない。いずれの方法を用いた場合も、環境の影響による伝送ファイバの PSP の任意変化に追随するために、DGD 素子の線形固有軸のエンドレス変換を行う機能が必要になる。

【0024】

上述したように、エンドレスかつリセットフリー偏波制御は、2種類の方法に大別できる。

1. 巻き戻し動作が必要なもの
2. 巻き戻し動作が不要なもの

巻き戻し動作が必要なデバイスは、例えば、 4π の遅延調整レンジを有する、 0° 、 45° 、 0° 、および 45° の傾きの4つの遅延器からなる。この場合、ファイバスクイーズ、ジルコン酸チタン酸鉛ランタン (PLZT)、液晶 (LC)、またはファラデー回転子が遅延器として用いられる。動作中に、これらの遅延器の1つが制御限界に達すると、巻き戻さなければならなくなる。この巻き戻し動作は、要求される動作が任意の変化する偏波状態を静的偏波に変換すること、またはその逆である場合には、上述したデバイスに対して常に可能である。しかし、巻き戻しには処理時間がかかり、高速変動が起こったり、任意の変化する偏波から任意の変化する偏波への変換が用途上要求されたりすると、巻き戻しは失敗するかも知れない。

【0025】

巻き戻し動作が不要なデバイスは、例えば、エンドレスに回転可能な $1/4$ 、 $1/2$ 、および $1/4$ 波長板の組み合わせからなる。正しい動作を保証するには、波長板の遅延量が正確である必要がある。結果として、このデバイスは、非常に限られた波長レンジに対してのみ適用可能となる。さらに、要求される構造のため、低速な方法となる。高速な方法は、 0° 、 45° 、 0° 、 45° 、および 0° の傾きの5つの可変遅延器、または3電極構造の LiNbO_3 ベースのデバイスからなるデバイスによる方法である。このようなデバイスは、デバイスの性質（印加された制御信号によるデバイス特性の変化）が周知である場合に、そしてその場合に限り、おおむねエンドレスかつリセットフリーな動作を可能にする。キャリブレーションは可能であるが、静的環境において短時間のみ適用可能である（温度依存性、DCドリフト、経年変化等）。この種の問題は、他の特許文献においても論じられている（例えば、特許文献1、2、および3を参照）。

【0026】

巻き戻し動作が不要な偏波コントローラは、おおむね最も高速かつ最も信頼性の高い偏波制御方法を提供するため、信頼性のある所望の変換機能を常に提供するように構成され、制御されるデバイスであれば、特に関心を引く。デバイスの用途には、高速偏波制御（安定化）および高速PMD補償が含まれる。

【非特許文献1】Jun-ichi Sakai, Susumu Machida, Tatsuya Kimura, "Degree of Polarization in Anisotropic Single-Mode Optical Fibers: Theory", IEEE Journal of Quantum Electronics, Vol. QE-18, No. 4, pp. 488-495, 1982

【非特許文献2】N. G. Walker and G. R. Walker, "Polarization control for coherent communications", Journal of Lightwave Technology, Vol. 8, No. 3, pp. 438-458, 1990

【特許文献1】特表2002-532752号公報（国際公開第WO00/36459号）

【特許文献2】特開2001-244896号公報

【特許文献3】特開2002-033701号公報

【発明の開示】

【0027】

本発明の課題は、環境変化および時間とともに変化するデバイス特性の問題を克服する偏波制御方法と、そのような方法を実装した偏波モード分散補償器を提供することである。

【0028】

本発明の第1の局面において、偏波モード分散補償器は、偏波変換器、補償光学部、歪みアナライザ、および制御回路を備える。偏波変換器は、入力光信号の偏波を変換し、補償光学部は、入力光信号の偏波モード分散を補償して、出力光信号を出力する。歪みアナライザは、出力光信号の偏波状態および歪みを計測し、計測された偏波状態および歪みを

表すフィードバック信号を生成する。制御回路は、そのフィードバック信号に基づいて、歪みが計測される複数の目標偏波状態が後続動作における出力光信号内で実現されるように偏波変換器を調整する、制御信号を生成する。

【0029】

本発明の第2の局面において、歪みアナライザは、歪み情報として出力光信号の偏光度を計測する。そして、制御回路は、偏波空間における実際の状態の周辺で最大偏光度の状態を探索することでそれらの目標偏波状態の中から最適状態が見つけれられるように偏波変換器を調整する、制御信号を生成する。

【0030】

本発明の第3の局面において、歪みアナライザは、歪み情報として出力光信号の偏光度を計測する。そして、制御回路は、計測された偏波状態および偏光度を記録し、偏波の変化から、偏波空間においてそれらの目標偏波状態が互いに均等に分離し、かつ、実際の状態から均等に離れるように偏波変換器を調整する、制御信号を計算する。

10

【0031】

本発明の第4の局面において、歪みアナライザは、歪み情報として出力光信号の偏光度を計測する。そして、制御回路は、計測された偏波状態および偏光度を記録し、偏波の変化から、偏波空間においてそれらの目標偏波状態が互いに不均等に分離し、かつ、実際の状態から不均等に離れるように偏波変換器を調整する、制御信号を計算し、偏波空間における各目標偏波状態と実際の状態の間の距離を用いてそれらの目標偏波状態における計測された偏光度を重み付けする。

20

【0032】

本発明の第5の局面において、制御回路は、それらの目標偏波状態の一部が実現されない場合に偏波変換器の変化するデバイス特性を認識し、偏波変換器のデバイス特性を記述する電圧を再計算して計算された電圧を偏波変換器に印加する制御信号を生成することで、偏波変換器をエンドレスに回転可能な波長板のように動作させる、という対策をとる。

【発明を実施するための最良の形態】

【0033】

以下、図面を参照しながら、本発明の好ましい実施形態を詳細に説明する。

環境変化および時間とともに変化するデバイス特性の問題を克服するために、PMD補償器を効果的に実現する上でフィードバックのためにとにかく用いられる、偏光計により供給される情報を用いた方法を採用する。この方法を制御のタイミングに組み入れれば、処理時間の増加やより洗練された制御ロジックの必要性を回避しつつ、それを適用することが可能になる。

30

【0034】

偏波モード分散による信号歪みの指標としての偏光度(DOP)は、PMD補償器の制御に用いることができるが、偏波変換器の変化する特性を補償するためには、偏波状態、特に、偏波変換器に印加される制御信号の変化に伴う偏波状態の変化に関する付加情報を用いることが効果的である。以下では、変化するデバイス特性に対して耐性のある制御アルゴリズムの効果的な実現のために、DOPをフィードバック信号として適応偏波モード分散補償器(PMDC)に印加するとともに偏波状態に関する付加情報を用いる、様々な方法について説明する。

40

【0035】

最初にPMDCが最適状態にある、すなわち、PMDによる歪みを補償光学系の能力の最大限で補償していると仮定すると、この最適状態は最大化されたDOPに対応する。さらに、偏光計により計測された偏波状態は既知である。この偏波状態は、方位角 θ および楕円率 ε の2つの変数(角度)により完全に記述される。PMDCの前方の伝送範囲におけるPMD状態が変化すると、DOPおよび偏波状態の両方が変化する。そのとき、もはやPMDCは最適状態にはない。新たな最適状態、すなわち、偏波変換器および補償光学系に印加すべき制御信号を見つけるためには、PMDCは、前の最適状態の周辺でDOPをテストしなければならない。このテストは、わずかに変更した制御信号を印加しながら

50

、DOPを増大させるような変更を探索することで、遂行できる。この単純なアプローチを実際のシステムで用いる場合、2つの問題が発生する。

1. 偏波変換デバイスの変化するデバイス特性のために、PMDCをその最適状態に調整するのに必要な変換が可能であることは保証されない。さらに悪いことに、DOPを信号歪みの指標として用いて制御ロジックにフィードバックを供給するだけでは、必要な変換が実行できない状況を識別することさえ不可能である。この問題は、PMD補償デバイスに対するフィードバック信号としてDOPを用いた場合に限られない。スペクトルホールバーニング、アイオープニング計測、またはビット誤り率のような他のフィードバック方法にも当てはまる。これらの方法はすべて、歪みの指標を提供するのみである。

2. 制御信号を所定ステップだけ変更することは、PMDCが補償状態をはっきりと異なるステップだけ変化させることを意味するわけではない。実際には、伝送範囲のPMD状態とPMDCの状態とに依存して、1つの制御信号の変化はPMDCの補償状態に対して微小変化のみをもたらす。1つの制御信号のいかなる変化もPMDCの補償状態に対してまったく変化をもたらさない、といった状況さえ起こり得る。例えば、このような状況は、変換すべき偏波が偏波変換デバイスの1つの区間の固有軸に近い場合に起こる。

【0036】

1および2に伴う問題を克服するため、PMDCの偏波変換デバイスを以下の記述に従って制御する。最初に、最大DOPを見つけることにより、PMDを補償光学系の能力の最大限で補償するような状態にPMDCを設定する。この設定は、偏光計により計測される偏波がポアンカレ球全体 ($-45^\circ \leq \text{楕円率} \leq 45^\circ$, $-90^\circ \leq \text{方位角} \theta \leq 90^\circ$) を覆うように偏波変換デバイスを調整して、DOP値を計算することにより、行われる。得られたDOP値対方位角および楕円率の2次元マップから、DOPの大域的最大値が分かる。PMDCの偏波変換器は、この最大DOP値に対応する状態に設定される。補償光学系が付加的な調整機能、すなわち、付加された自由度を持つ場合は、大域的最適値を見つけるために2次元DOPマップを取得しながら、制御パラメータを連続的に変更することができる。大域的最適値を見つけるための上述した動作は、PMDCのスイッチを入れたときにだけ許される。伝送システムの動作中は、PMDCが大域的最大値を見つけるためにすべての可能な状態を走査することは、その動作が光信号に大きな歪みを生じさせるため、許されない。伝送システムの動作中には、PMDCは、許容できない信号歪みを生じさせることなく、変化するPMD状態を追跡して最適状態を見つける必要がある。このとき、制御信号のディザリング（制御信号に小さな変更を加えること）は、最適状態を追跡する1つの方法となる。変化するデバイス特性（経年変化、温度等）により、実際の用途では上述した問題が発生する。これらの問題を克服するため、効果的な方法としては、制御信号の空間上ではなく、偏光計により計測される偏波の空間上で、偏波変換デバイスの状態の最適化を行う。

【0037】

図8は、この効果的な方法を採用したPMDCの構成を示している。このPMDCは、偏波変換器82、適応光学系83、制御回路84、および偏光計85を備える。入力光86は、偏波変換器82および適応光学系83を通過し、出力光87として出力される。偏光計85は、図1の歪みアナライザ14に対応し、出力光87の偏波状態および偏光度を計測してフィードバック信号を生成する。制御回路84は、偏光計85からのフィードバック信号を用いて、偏波変換器82および適応光学系83に対する制御信号を生成する。

【0038】

ストークスベクトル

\vec{S}

【0039】

【数 4】

$$\vec{S} = \begin{pmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} \quad (1 \ 0)$$

10

【0 0 4 0】

により偏波状態を記述すると、DOPは偏光パワーと全パワーの商として計算される。

【0 0 4 1】

【数 5】

$$DOP = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}}{S_0} \quad (1 \ 1)$$

20

【0 0 4 2】

このPMD Cは、図9に示すフローチャートに従って動作する。まず、偏光計85は、偏波空間の初期最適位置における初期ストークスベクトルおよびDOPを計測する（ステップ91）。ポアンカレ空間上の初期最適位置A0の例を、図10に示す。図11は、角度 θ および ε の2次元空間におけるA0の別の見方を示している。

【0 0 4 3】

制御回路84は、ストークスベクトルがA0の周囲の円上になるように偏波変換器82を駆動し、そのときのDOP値を記憶する（ステップ92）。図10および11では、一例として、8つの目標位置A1乃至A8がA0の周囲の円上に配置されている。次に、制御回路84は、すべての目標位置が実現されたか否かをチェックする（ステップ93）。もし、それらの目標位置の1つが実現できなければ、制御回路84は、偏波変換器82のデバイス特性を変更して（ステップ94）、ステップ92以降の動作を繰り返す。図6に示したLiNbO₃基板上の偏波制御デバイスを用いた場合は、 V_{bias} 、 V_0 、および

30

 V_{π}

を変更する制御信号が偏波変換器82に出力される。すべての目標位置が実現できた場合、制御回路84は、ストークスベクトルがそれらの目標位置に対するストークスベクトルの中で最大DOPを持つものとなるように偏波変換器82を駆動し（ステップ95）、その最大DOPの位置を新たな初期位置としてステップ92以降の動作を繰り返す。A1乃至A8の中でA4が最大DOPを伴う場合は、図12に示すように、この位置が新たな初期位置B0となり、新たな目標位置B1乃至B8が実現されることになる。

40

【0 0 4 4】

上述した制御によれば、初期最適状態から開始して、偏光計85により計測される偏波が初期最適位置A0の周囲の円上に配置されるように、偏波変換器82に印加される制御信号が調整される。位置A1乃至A8の各々において計測されたDOP値から、新たな最適状態を指す方向が計算される。伝送システムのPMD状態が変化しなければ、A1乃至A8におけるすべてのDOP値が初期状態におけるDOP値より小さくなる。そこで、偏

50

波変換器 8 2 はこの初期状態に再設定され、その状態から初期偏波の周辺における D O P 値の精査を再開する。P M D 状態が変化すると、A 1 乃至 A 8 において計測された D O P 値の少なくとも 1 つが初期 D O P 値より大きくなる。そこで、偏波変換器 8 2 はこの新たな状態に調整され、その状態から新たな状態の周辺における D O P 値の精査を再開する。上記ステップを何度も繰り返すことにより、P M D C の偏波変換デバイスは、伝送システムの変化する P M D 状態を追跡する。D O P 値が精査される、偏波空間において均等に分離した状態をもたらす制御信号を見つけるために、任意の初期制御信号の集合から制御が開始する。そして、制御信号と偏波状態の変化の両方が記録される。どんな制御信号がどんな偏波変化をもたらすかが分かっているならば、次のシーケンスにおいて偏波が均等分離の理想的条件により近づくように、次の制御信号の集合を計算することができる。この動作を何度も繰り返すことにより、D O P 値が計測される、均等に分離した状態を実現するために印加されるべき制御信号が、見つけられる。例えば、精査された偏波状態の次善最適集合は、図 1 3 に示すようになる。ここでは、初期位置 C 0 の周囲の C 1 乃至 C 8 が実現され、C 1 の偏波のみが実際の偏波に対して理想的な距離にあることが分かる。それに続く状態は、より短い距離にある。アルゴリズムは、次の動作において、短い距離の偏波が実際の状態からより遠くに離れて配置されるように、知得された距離から新たな制御信号の集合を計算する。

【 0 0 4 5 】

偏波変換器 8 2 のデバイス特性が変化した場合に起こると思われる状況を、図 1 4 に示す。位置 D 0 における実際の状態の周辺で、位置 D 1 乃至 D 8 における偏波が実現されるが、制御アルゴリズムは、デバイス記述電圧を用いて偏波変換器 8 2 をエンドレスに回転可能な波長板のように動作させる制御を行っても、所望の偏波 1 4 1 に決して達することができない。このような状況になると、制御アルゴリズムは、すべての目標偏波が初期偏波の周囲の円上に再配置されるように、偏波変換器 8 2 のデバイス特性を記述する電圧をわずかに変更する。これらの目標偏波は与えられている（初期状態の周囲の円上に配置されなければならない）ので、偏波変換器 8 2 のデバイス特性を変更するような状況は、常に認識可能である。

【 0 0 4 6 】

図 1 5 は、図 8 に示した P M D C の構成の具体例を示している。この P M D C は、偏波変換デバイス 1 5 0 1、偏波保持ファイバ 1 5 0 2 (0 °)、1 5 0 4 (9 0 °)、制御回路 1 5 0 5、可変遅延器 1 5 0 3 (4 5 °)、ビームスプリッタ 1 5 0 6、遅延器 1 5 0 7 ($\lambda/4$)、偏光子 1 5 0 8 (0 °)、1 5 0 9 (4 5 °)、1 5 1 0 (0 °)、およびフォトダイオード 1 5 1 1 乃至 1 5 1 4 を備える。偏波変換デバイス 1 5 0 1 および制御回路 1 5 0 5 は、図 8 の偏波変換器 8 2 および制御回路 8 4 にそれぞれ対応する。偏波保持ファイバ 1 5 0 2、1 5 0 4 および可変遅延器 1 5 0 3 は、図 8 の適応光学系 8 3 に対応する。ビームスプリッタ 1 5 0 6、遅延器 1 5 0 7、偏光子 1 5 0 8、1 5 0 9、1 5 1 0、およびフォトダイオード 1 5 1 1 乃至 1 5 1 4 は、図 8 の偏光計 8 5 を形成する。

【 0 0 4 7 】

偏波変換デバイス 1 5 0 1 は、図 7 に示した L i N b O₃ 基材上の少なくとも 3 段または多段の 3 電極構造により実現される。適応光学系は、可変遅延器 1 5 0 3 により分離された 2 区間の群遅延時間差生成素子 1 5 0 2 および 1 5 0 4 を備え、可変遅延器 1 5 0 3 の固有軸は、それぞれの群遅延時間差生成素子の固有軸に対して 4 5 ° の傾きを持つ。より一般的には、適応光学系は、2 つの隣接する群遅延時間差生成素子の各々の固有軸に対して 4 5 ° の傾きの固有軸を持つ、独立に制御可能な複数の可変遅延器により分離された、多数区間の群遅延時間差生成素子を備えることも可能である。フォトダイオード 1 5 1 1、1 5 1 2、1 5 1 3、および 1 5 1 4 により検出される強度をそれぞれ I_0 、 I_1 、 I_2 、および I_3 と記すと、ストークスベクトル

\vec{S}

は、次式により求められる。

【0048】

【数6】

$$\vec{I} = \begin{pmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{pmatrix} \quad (12)$$

10

$$\vec{S} = E \cdot \vec{I} \quad (13)$$

E：単位行列

20

【0049】

上述した実施形態では目標位置が円上に配置されているが、提案する方法は、初期位置を円形に取り囲むことを目標とするストークスベクトルに限定されるものではない。円は最も実装しやすい形状であり、重み付けを必要としない。円以外の形状は、次の初期位置の決定にあたって重み付けを必要とする。例えば、目標位置を配置する形状として楕円を用いることも可能である。重み付けは、位置A1乃至A8におけるDOP値に初期位置A0からの距離の逆数を乗算することで、行うことができる（しかし、これには限定されない）。この重み付けは、そうしなければ起こる可能性のある、小さな距離に対する小さなDOP変化の重要性を過小評価したための誤判定に対して、効果的な対策となる。

【0050】

30

さらに、信号歪みを表す他の情報をフィードバック信号として用いることも可能である。図16および図17に例を示す。

図16に示すPMD Cは、偏波変換器1601、適応光学系1602、制御回路1603、偏光計1604、フォトダイオード1605、およびバンドパスフィルタ1606を備える。偏光計1604は、出力光の偏波状態（ストークスベクトル）を計測し、フィードバック信号を生成する。これは、初期位置の周囲の円上の複数の目標SOPが実現されたか否かを追跡するために必要である。フォトダイオード1605は、出力光を検出して、電気信号を生成し、バンドパスフィルタ1606は、次の初期位置の決定のためのフィードバック信号を生成する。バンドパスフィルタ1606の帯域は、 B/n （ B ：信号光のビットレート、 $n=2, 4, 6, \dots$ ）の特定周波数成分が検出できるように決定される。制御回路1603は、偏光計1604およびバンドパスフィルタ1606からのフィードバック信号を用いて、偏波変換器1601および適応光学系1602に対する制御信号を生成する。

40

【0051】

図17に示すPMD Cは、偏波変換器1701、適応光学系1702、制御回路1703、および偏光計1704を備える。受信部1705および前方誤り訂正（FEC）部1706は、受信器側に設けられる。偏光計1704は、図16に示した構成と同様に、出力光の偏波状態（ストークスベクトル）を計測し、フィードバック信号を生成する。前方誤り訂正部1706は、次の初期位置の決定のための情報として、エラーカウントのフィードバック信号を生成する。制御回路1703は、偏光計1704および前方誤り訂正部

50

1706からのフィードバック信号を用いて、偏波変換器1701および適応光学系1702に対する制御信号を生成する。

【0052】

以上詳細に説明したように、本発明によれば、環境変化および時間とともに変化する、PMDCのデバイス特性に対して、耐性のある偏波制御が提供される。したがって、デバイス特性が変化する場合であっても、PMDCをその最適状態に調整することが可能になる。

【図面の簡単な説明】

【0053】

【図1】従来の偏波モード分散補償器の構成を示す図である。

10

【図2】瞬時の群遅延時間差の関数としての偏光度、Qペナルティ、およびスペクトル成分を示す図である。

【図3】瞬時の群遅延時間差の関数としての偏光度、Qペナルティ、およびスペクトル成分の詳細を示す図である。

【図4】4つの可変遅延器からなる偏波変換器の構成を示す図である。

【図5】3つの回転可能な波長板からなる偏波変換器の構成を示す図である。

【図6】LiNbO₃基板上の偏波変換器の基本構造を示す図である。

【図7】任意の変化する入力偏波を任意の変化する出力偏波に変換する機能を持つ、LiNbO₃基板上の偏波変換器の基本構造を示す図である。

【図8】信号歪みの情報として偏光度を採用した偏波モード分散補償器の構成を示す図である。

20

【図9】偏波モード分散補償器の動作のフローチャートである。

【図10】ポアンカレ球上における最適状態の探索を示す図である。

【図11】2次元偏波空間における最適状態の探索を示す図である。

【図12】ポアンカレ球上における最適状態の別の探索を示す図である。

【図13】2次元偏波空間における最適状態の別の探索を示す図である。

【図14】所望の偏波に達することができない状況を示す図である。

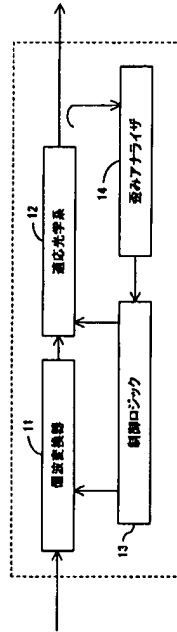
【図15】偏波モード分散補償器の構成の具体例を示す図である。

【図16】信号歪みの検出にフォトダイオードおよびバンドパスフィルタを採用した偏波モード分散補償器の構成を示す図である。

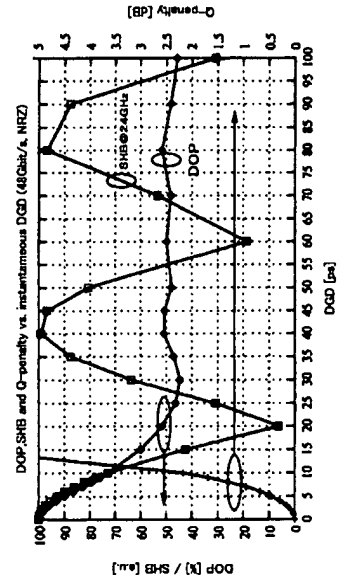
30

【図17】信号歪みの検出に前方誤り訂正部を採用した偏波モード分散補償器の構成を示す図である。

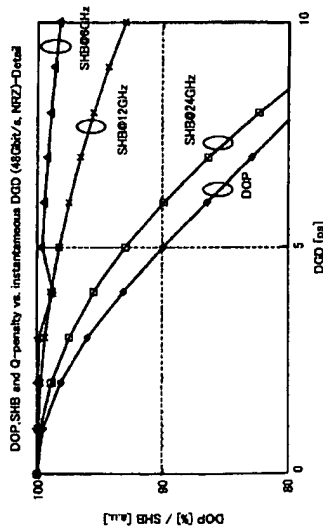
【図 1】



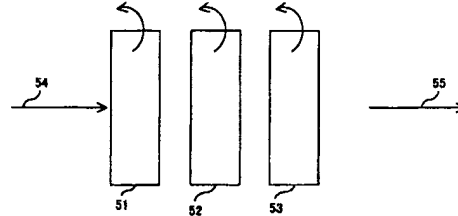
【図 2】



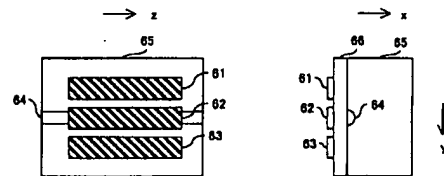
【図 3】



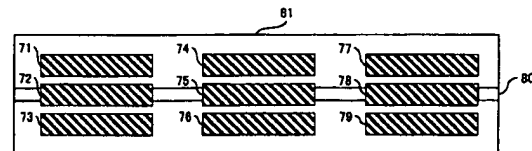
【図 5】



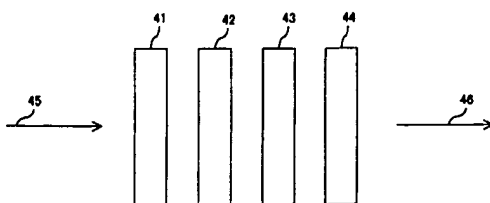
【図 6】



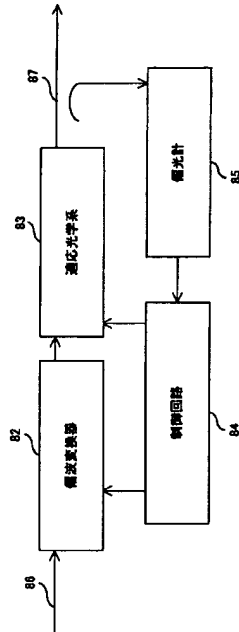
【図 7】



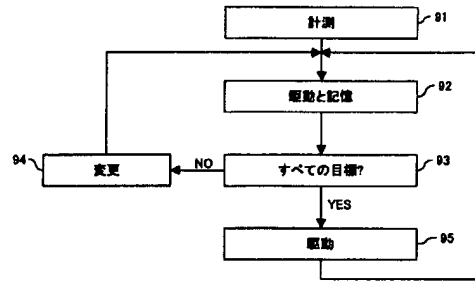
【図 4】



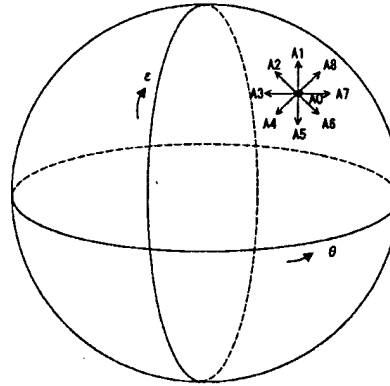
【図 8】



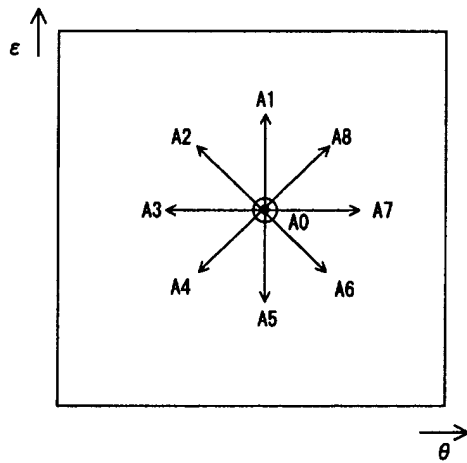
【図 9】



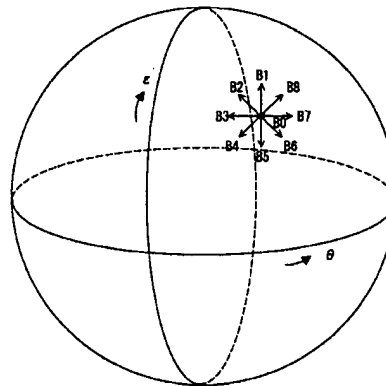
【図 10】



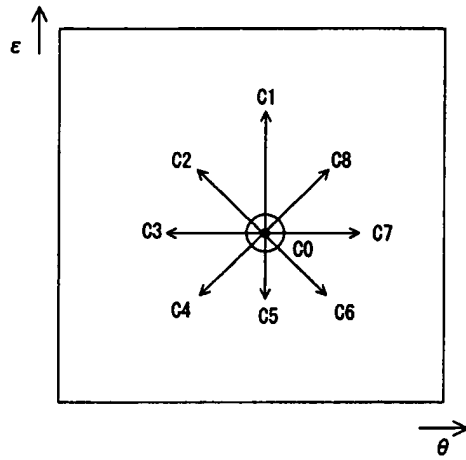
【図 11】



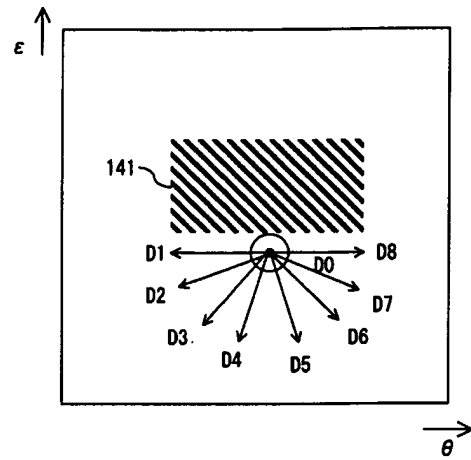
【図 12】



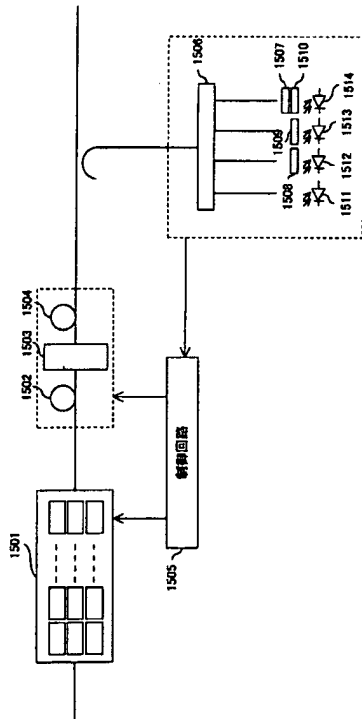
【図 1 3】



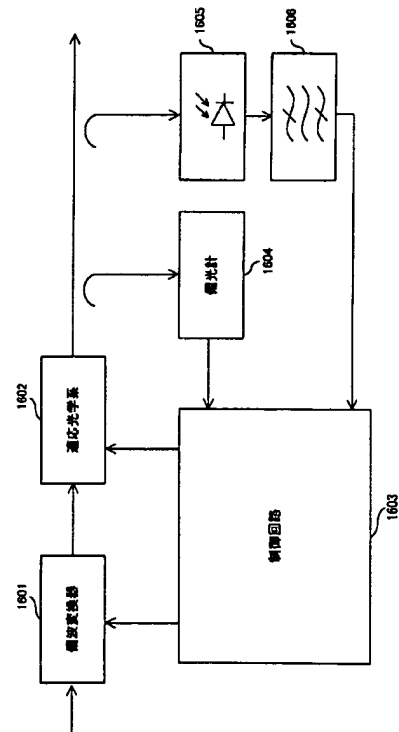
【図 1 4】



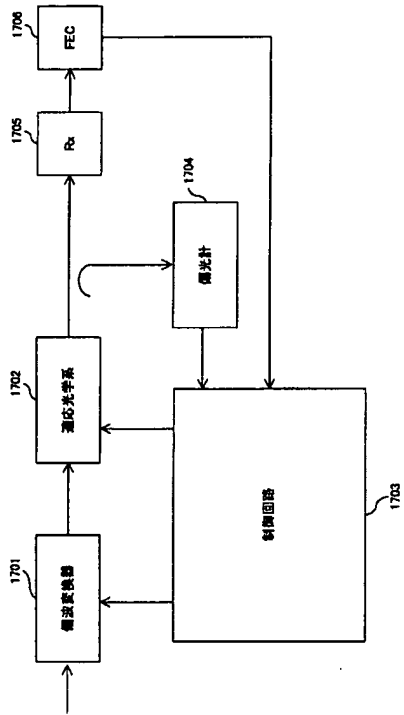
【図 1 5】



【図 1 6】



【図 17】



【国際調査報告】

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/JP 03/08767

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
IPC 7 H04B10/18

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)
IPC 7 H04B

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practical, search terms used)

EPO-Internal, WPI Data, PAJ

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	US 2002/018266 A1 (ISHIKAWA GEORGE ET AL) 14 February 2002 (2002-02-14) cited in the application paragraph '0069! - paragraph '0073!; figure 1	1-11
X	US 6 498 886 B1 (WHITING MATTHEW S ET AL) 24 December 2002 (2002-12-24) column 10, line 23 -column 11, line 32; figure 5	1-11
X	US 2002/021854 A1 (BANDEMER ADALBERT ET AL) 21 February 2002 (2002-02-21) paragraph '0042! - paragraph '0052!; figures 1,2	1-11
	-/-	

☒ Further documents are listed in the continuation of box C.

☒ Patent family members are listed in annex.

* Special categories of cited documents:

A document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

E earlier document but published on or after the international filing date

L document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

O document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

P document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

T later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

X document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

Y document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

8 document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

26 March 2004

Date of mailing of the international search report

02/04/2004

Name and mailing address of the ISA

European Patent Office, P.B. 5618 Patentlaan 2
NL - 2280 HV Rijswijk
Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,
Fax (+31-70) 340-3016

Authorized officer

Ciccarese, C

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International	Publication No
PCT/JP	03/08767

C.(Continuation) DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	US 2002/141680 A1 (SMITH JAMES A ET AL) 3 October 2002 (2002-10-03) paragraph '0022! - paragraph '0027!; figure 1	1-11
X	WO 00 36459 A (SIEMENS AG) 22 June 2000 (2000-06-22) the whole document	1-11

Information on patent family members				Internati	Application No
				PCT/JP 03/08767	
Patent document cited in search report		Publication date	Patent family member(s)		Publication date
US 2002018266	A1	14-02-2002	JP 2002033701	A	31-01-2002
US 6498886	B1	24-12-2002	US 6556732	B1	29-04-2003
			AU 6098701	A	27-08-2001
			AU 6290901	A	27-08-2001
			AU 6295001	A	17-12-2001
			CA 2400091	A1	23-08-2001
			EP 1279245	A2	29-01-2003
			JP 2004500767	T	08-01-2004
			TW 508921	B	01-11-2002
			WO 0161888	A2	23-08-2001
			WO 0161889	A2	23-08-2001
			WO 0195528	A2	13-12-2001
			US 6487352	B1	26-11-2002
			US 2002064329	A1	30-05-2002
US 2002021854	A1	21-02-2002	DE 10035083	A1	27-09-2001
			AU 6576601	A	20-11-2001
			AU 6892001	A	20-11-2001
			WO 0186840	A2	15-11-2001
			WO 0186333	A2	15-11-2001
			DE 10033819	A1	27-09-2001
			DE 10191854	D2	08-05-2003
			DE 10191882	D2	10-07-2003
			EP 1282835	A2	12-02-2003
			EP 1281251	A2	05-02-2003
			JP 2003532880	T	05-11-2003
			JP 2003532926	T	05-11-2003
			CA 2338343	A1	17-01-2002
			WO 0207351	A1	24-01-2002
US 2002141680	A1	03-10-2002	GB 2389725	A	17-12-2003
			WO 02073838	A2	19-09-2002
WO 0036459	A	22-06-2000	DE 19858148	A1	07-12-2000
			DE 19919576	A1	23-11-2000
			AU 770713	B2	26-02-2004
			AU 3030600	A	03-07-2000
			CA 2355189	A1	22-06-2000
			CN 1330776	T	09-01-2002
			WO 0036459	A1	22-06-2000
			EP 1141768	A1	10-10-2001
			JP 2002532752	T	02-10-2002
			US 6678430	B1	13-01-2004

フロントページの続き

Fターム(参考) 2H079 AA02 AA12 BA02 CA08 DA03 EB04 FA01 GA01 HA08 KA05
KA06 KA12 KA19 KA20